



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
АКАДЕМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Ж.И. АЛФЕРОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

194021, С.-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А
Телефон (факс): (812) 297-2145 www.spbau.ru

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке,

д. ф.-м. н.,
И.С. Мухин



Отзыв ведущей организации

на диссертацию Козырева Николая Владимировича

«Спиновая и энергетическая динамика носителей заряда и магнитных ионов марганца в квантовых ямах на основе разбавленного магнитного полупроводника (Cd,Mn)Te», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 –
– «Физика полупроводников»

Исследование спиновой динамики носителей заряда в полупроводниковых структурах представляет собой одно из ключевых направлений современной физики конденсированного состояния. Это связано с перспективами создания спинтронных устройств, обладающих высокой энергоэффективностью и быстродействием, а также с фундаментальными задачами управления спиновыми состояниями. Разбавленные магнитные полупроводники, такие как (Cd,Mn)Te, являются модельными системами для изучения спиновых явлений благодаря сильному обменному взаимодействию между носителями заряда и

магнитными ионами. Диссертация Н.В. Козырева посвящена экспериментальному исследованию оптических явлений, обусловленных обменным взаимодействием в квантовых ямах на основе (Cd,Mn)Te. Работа сочетает в себе фундаментальную научную новизну и потенциальную практическую значимость для развития спинтроники и квантовых технологий. Актуальность темы подтверждается активным интересом научного сообщества к магнитным полупроводникам, что отражено в многочисленных публикациях, в частности, в цитируемых в диссертации работах.

Диссертация включает введение, 5 глав и заключение. Список цитируемой литературы насчитывает 77 наименований, включая 4 публикации автора диссертации.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, работы, а также представлены положения, выносимые на защиту. Автор также подчеркивает значимость исследования.

В первой главе представлен обзор современных представлений о разбавленных магнитных полупроводниках, их свойствах и особенностях. Автор подробно описывает гигантское спиновое расщепление, магнитополяронный эффект, гетероструктуры на основе таких полупроводников, включая особенности проектирования квантовых ям с использованием (Cd,Mn)Te и немагнитных барьеров (Cd,Mg)Te и оптические методы исследования подобных структур (фотолюминесценция, рамановское рассеяние света и эффект Керра), позволяющие изучать спиновую и энергетическую динамику. Эта глава служит основой для последующих экспериментальных исследований

Во второй главе описаны использованные Н.В. Козыревым экспериментальные методики исследований: поляризованная фотолюминесценция, комбинационное рассеяние света, эффект Керра с

временным разрешением и экспериментальные образцы - квантовые ямы $(\text{Cd,Mn})\text{Te}/(\text{Cd,Mg})\text{Te}$ с различными концентрациями марганца и ширинами, гибридные структуры с немагнитными (CdTe) и магнитными $((\text{Cd,Mn})\text{Te})$ квантовыми ямами, разделёнными барьерами разной ширины. Методическая часть исследований выполнена на высоком уровне, с использованием современного оборудования и контролем параметров эксперимента.

Третья глава диссертационной работы посвящена исследованию магнитополяронного эффекта в квантовых ямах $(\text{Cd,Mn})\text{Te}$. Основным представленный здесь результат — это наблюдение трионного магнитополярона (впервые обнаружен сдвиг энергии фотолюминесценции дырочного триона в поперечном магнитном поле в геометрии Фойгта). Н.В. Козыревым также показано, что максимум интенсивности рассеяния с переворотом спина ионов марганца совпадает с областью магнитополяронного сдвига и предложена модель, объясняющая сдвиг через стабилизацию триплетного состояния триона в сильном обменном поле. Результаты главы имеют значительную новизну.

В четвертой главе автором диссертации изучено явление двойного резонанса комбинационного рассеяния с испусканием продольного оптического фонона. Автором выявлены два типа резонансов: с участием лёгкой и тяжёлой дырок (наиболее эффективный) и с участием только тяжёлых дырок (менее эффективный из-за необходимости обменного взаимодействия). Показано, что процессы с изменением проекции углового момента дырки доминируют. В этой части работа Н.В. Козырева расширяет понимание электрон-фононного взаимодействия в разбавленных магнитных полупроводниках.

Пятая глава посвящена исследованию гибридных структур $\text{CdTe}/(\text{Cd,Mn})\text{Te}$. Основные достижения здесь связаны с обнаруженным влиянием магнитной ямы на спиновые свойства немагнитной ямы через

узкий барьер (перенормировка g -фактора), с идентификацией резидентных и экситонных электронов с разными временами дефазировки и определением зависимости величины этого влияния (эффекта близости) от ширины барьера. Эти результаты важны для проектирования спинтронных устройств с управляемыми свойствами.

В заключении сформулированы основные итоги выполненных исследований.

В диссертации представлен ряд значимых научных результатов:

1. Первое наблюдение трионного магнитополярона и исследование его поведения в магнитном поле.
2. Обнаружение двойного резонанса рамановского рассеяния с испусканием ЛО фонона между различными экситонными состояниями.
3. Демонстрация короткодействующего эффекта близости в гибридных структурах.

В целом, диссертация представляет собой яркую и тщательно выполненную работу, которая демонстрирует актуальность исследования и его значимость в развитии науки твёрдого тела. Это направление исследований открывает новые возможности для дальнейших исследований и приложений в целом ряде областей науки и техники.

Достоверность результатов обеспечена современными методиками эксперимента и подтверждена воспроизводимостью данных и их согласием с теоретическими моделями и литературными данными там, где такое сопоставление возможно.

Следует отметить, что диссертация хорошо построена логически, качественно иллюстрирована, в ней корректно используется терминология, в тексте практически отсутствуют стилистические и грамматические ошибки и опечатки, что, к сожалению, сейчас является довольно редким случаем.

Материалы диссертации опубликованы в четырех печатных работах в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в том числе в трех статьях в журнале Physical Review B. Основные результаты диссертации докладывались автором на научных конференциях. Содержание диссертации адекватно отражено в автореферате.

К несущественным недостаткам работы можно отнести

1. Недостаточное обсуждение влияния температуры на магнитополяронный эффект.
2. Имело смысл указать, в какой степени приближение «обменного ящика» может повлиять на представленные расчетные результаты. В частности, не может ли более быстрый спад расчетных кривых по сравнению с экспериментальными на рисунке 3.10 связан с использованием модели «ящика», т.е. заменой истинной волновой функции на ее «прямоугольное» приближение?

Резюмируя сказанное, можно констатировать, что диссертационная работа Н.В. Козырева выполнена на высоком научном уровне и является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно и на высоком научном уровне. Полученные в работе результаты и выводы являются достоверными и обоснованными. Автореферат диссертации и публикации автора в высокорейтинговых научных изданиях полностью отражают научную новизну и содержание работы. Приведенные в работе научные результаты позволяют квалифицировать их как существенные для современной физики полупроводников.

Тематика выполненных Н.В. Козыревым исследований соответствует паспорту специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников», а диссертационная работа Н.В. Козырева по форме и содержанию соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно

Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук и установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением №842 Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. Автор диссертации Козырев Николай Владимирович заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

Отзыв составлен на основании обсуждения диссертации и автореферата на научном семинаре Центра нанотехнологий Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук».

Профессор, заведующий кафедрой микро- и наноматериалов федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук», д.ф.-м.н.



Липовский Андрей Александрович

194021 Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д.8, корпус 3, лит. А, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук»,
телефон: (812) 297-21-45, факс: (812) 448-69-98, e-mail: office@spbau.ru